مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/

انجمن آهن و فولاد ایران



بررسی رفتار سایشی نانوکامپوزیت زمینه آلیاژ Cu-5Zn تقویت شده با نانولوله های کربنی*

مقاله پژوهشی

محمد علی پور(۱)

DOI: 10.22067/jmme.2023.80885.1103

چکیده *در تحقیق حاضر، نانوکامپوزیت های زمینه آلیاژی مس-روی با فاز تقویت کننده نانو لوله های کربنی مورد مطالعه قرار گرفت. نانو لوله های کربنی در هر دو حالت بدون پوشش و با پوشش نیکل، به عنوان تقویت کننده نانوکامپوزیت مس-روی مورد استفاده قرار گرفتند. نانوکامپوزیت‌ها با درصدهای مختلف از نانو لوله های کربنی (۱-۰,۲۵ در صد وزنی) با استفاده از امواج التراسونیک، آسیاب گلوله ای، زینتر تهیه شدند. برای بررسی ساختاری و مورفولوژی نانوکامپوزیت‌ها و پراکندگی نانو لوله های کربنی از SEM استفاده شد. اثر نانو لوله های کربنی بر خواصی همچون اصطکاک و سایش نانوکامپوزیت های مس با استفاده از روش استاندارد ASTM-G99 بررسی شد. ضریب اصطکاک نانوکامپوزیت های تقویت شده با ۱٪ وزنی فاز تقویت کننده نانو لوله های کربنی بدون پوشش و با پوشش نیکل در مقایسه با آلیاژ پایه مس-روی کاهش پیدا کرده و به طور مشابهی، میزان سایش نانوکامپوزیت ها با افزایش تقویت کننده نانولوله های کربنی نیز کاهش یافته است. پایین بودن ضریب اصطکاک و میزان سایش، به پراکندگی یکنواخت نانو لوله های کربنی و تشکیل لایه روانکار از کربن بر روی سطح نانوکامپوزیت در طی مراحل سایش مربوط است.*

واژه‌های کلیدی نانولوله های کربنی، مس، اصطکاک و سایش، نانوکامپوزیت.

Investigating the Wear Behavior of Nanocomposite Based on Cu-5Zn Alloy Reinforced with Carbon Nanotubes

Mohammad Alipour

Abstract *In the present work we report the development of carbon nanotube reinforced copper-zinc alloy nanocomposites. The carbon nanotubes were used in both uncoated and nickel coated conditions to reinforce copper matrix. The nanocomposites with different carbon nanotubes (0.25 to 1.0) weight percentage were developed using a combination of ultrasonication, ball milling and sintering processes. The developed nanocomposites were subjected to microstructural characterization using scanning and transmission electron microscopes to observe the dispersion of carbon nanotubes. The effect of carbon nanotubes on friction and wear properties of copper nanocomposites were studied using pin on disc testing rig as per ASTM G99 standard. The coefficient of friction of both 1 wt% uncoated and nickel coated carbon nanotubes reinforced nanocomposites was found when compared to copper-zinc alloy. Similarly the wear rate of nanocomposites were found to decrease with the incoporation of carbon nanotubes. The low coefficient of friction and wear rate were attributed to uniform dispersion of carbon nanotubes and formation of carbonaceous layer on the surface of nanocomposites during dry sliding wear.*

Key Words Carbon Nanotubes, Copper, Friction and wear, Nanocomposites.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۱/۱۱ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۶/۷ می‌باشد.

(۱) استادیار، مهندسی مواد، دانشکده مکانیک، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز.

مقدمه

حوزه نانو مواد، توجه و تمرکز بسیاری از دانشمندان و مهندسان را در سراسر جهان به خود معطوف کرده است. به این به ترتیب با توجه به اینکه این مواد انعطاف پذیری بالایی دارند خواص ممتازی جهت سنتز مواد نانویی جدید را از خود نشان می دهند. مواد نانو ساختار ابعاد ذرات کوچکتر از 100 نانومتر دارند [1,2]. در این پژوهش نانولوله های کربنی مورد بررسی قرار گرفته است. در سال1991، سامیو لیجیما (SumioIijima) از شرکت NEC سنتز ساختارکربن سوزنی شکل را گزارش کرد. مطالعات میکروسکوپ الکترونی بر روی ساختار سوزنی نشان داد که هر سوزنها شامل لوله‌های گرافیتی است که تعداد آنها بین 50 –2 عدد است. لوله‌های گرافیتی با استفاده از تخلیه قوس با گاز آرگون سنتز شدند و کربن‌ها در انتهای الکترود منفی رشد کردند. نانولوله‌های کربن به صورت ورقه گرافنی به شکل لوله با قطر نانومتری تشکیل شده اند [6-3]. معمولا نانو لوله‌های کربنی به دو شکل یافت می شوند: نانو لوله های تک دیواره (SWCNTs) که به شکل لوله ای تک دیواره است و نانو لوله های چند دیواره (MWCNTs): که دارای لایه گرافن اضافی به دور نانو لوله تک دیواره هستند. نانو لوله های کربنی دارای استحکام فوق العاده‌ای از 63 GPa و مدول یانگ 1 TPa می‌باشند که در افزایش ظرفیت تحمل بار زمینه مفید هستند. طول عمر و ظرفیت الکتریکی آن حدود 1000 برابر بیشتر از فلز مس است که در حال حاضر کاربرد زیادی در صنایع الکترونیکی دارد [8-6]. با توجه به قابلیت‌های گسترده نانو لوله های کربنی در کامپوزیت‌ها، آن را برای کاربردهای مکانیکی، الکتریکی و حرارتی امکان پذیر ساخته است [13-9]. سامال کرپی (Sammalkorpi) و همکارانش [12] با استفاده از شبیه سازی دینامیک مولکولی و نظریه پیوستگی، حفره¬های مربوط به نقص در مدول یانگ و استحکام کششی نانو لوله های کربن را بررسی کردند. کاربرد نانو لوله های کربنی به عنوان فاز تقویت کننده در نانوکامپوزیت‌ها و با توجه به بهبود سختی، استحکام و چقرمگی کامپوزیت‌ها، توجه زیادی از دانشمندان را به خود جلب نموده است. زمینه های فلزی مورد استفاده عبارتند از آلومینیوم و مس [17-14] منیزیم [18]، نیکل [19] و تیتانیم [20]. این نانوکامپوزیت‌ها با روش‌های مختلفی از جمله متالورژی پودر،ریخته گری، اسپری حرارتی، رسوب دهی الکتریکی ساخته شده‌اند [20]. وو(Wu) و همکارانش [21] کامپوزیت‌های AA 6061/CNT را با روش پودر نیمه جامد جهت بهبود پراکندگی نانولوله‌های کربنی تهیه کردند. پراکندگی نانولوله‌های کربنی وابسته به مدت زمان آلیاژسازی مکانیکی است. اما با این وجود، تشکیل Al4C3 و کاهش قابلیت انعطاف‌پذیری کامپوزیت را مشاهده کردند. Chen و همکارانش [22] کامپوزیت‌های Cu/CNT با استفاده از روش متالوژی پودر و تقویت کننده نانولوله های کربنی با پوشش نیکل تهیه کردند. سختی کامپوزیت¬های Cu/CNT با افزایش کسر حجمی نانو لوله های کربنی افزایش یافت. باکشی (Bakshi) و همکارانش [23] نانوکامپوزیت Al-Si/MWCNT با استفاده از روش اسپری گاز سرد تهیه نمودند. آنها با استفاده از روش تعیین ساختار نانویی، مدول الاستیک که در محدوده 40-120 GPa برای کامپوزیت نامبرده با پوشش به ضخامت 500 میکرون و سطوح شکسته یکنواختی از نانو لوله های کربنی در زمینه مس تهیه کردند. در این تحقیق مدول کمتر مربوط به مکان هایی با تخلل زیاد و مدول بالا مربوط به مکان هایی با سیلسیم زیاد می باشد. Chen و همکارانش [24] کامپوزیتNi/CNT را با استفاده از روش الکترولیز تهیه نموده و خواص سایشی آن را مورد بررسی قرار دادند و کاهشی در ضریب اصطکاک با افزایش بار از 10 نیوتن به 30 نیوتن مشاهده کردند. روش متالورژی پودر برای تهیه نانوکامپوزیت‌ها با مخلوط و آماده¬سازی پودرفلز با نانو لوله‌های کرینی و با فشرده سازی آن ودر صورت لزوم از فرایندهای ثانویه مانند اکستروژن یا آهنگری استفاده شد. برخلاف سایر تکنیک¬های تولید، متالورژی پودر دارای مزایای متفاوتی مانند حذف ماشین کاری، سرعت بالای تولید، تولید اشکال پیچیده و تغییرات گسترده در ترکیبات می باشد. در حال حاضر مس به عنوان زمینه¬ای برای مواد کربنی از جمله گرافیت و گرافن به کار برده شده و نانولوله‌های کربنی به عنوان مواد خود روان‌کار ترجیح داده می شوند. این امر عمدتا سبب هدایت الکتریکی و حرارتی بالای و ضریب اصطکاک پایین برای فلز مس شده که بدلیل قابلیت روانکاری نانولوله‌ها می‌باشد. بسیاری از این کامپوزیت¬ها با روش متالورژی پودر تهیه شده‌اند [25].

با در نظر گرفتن خواص مکانیکی فوق العاده نانولوله‌های کربنی و توانایی روانکاری آن، تعدادی از کارهای تحقیقاتی برای بررسی خواص نسبی کامپوزیت مس با تقویت کننده مواد کربنی انجام شده است.گویدردونی (Guiderdoni) و همکارانش [26]

سختی، اصطکاک و سایش نانوکامپوزیت های مس را با تقویت کننده نانولوله کربنی با دیواره دو جداره بررسی کردند. مشاهده شده است که سختی نانوکامپوزیت ها 50% بیشتر از مس خالص است. ضریب اصطکاک پایین تر در سرعت پایین¬تر سایش به ترتیب 4 و 20 برابر به ترتیب نسبت به مس خالص برای نانوکامپوزیت ها بدست آمد. مواد کربنی تشکیل شده در طول آزمایش‌ها با لایه‌های مکانیکی مخلوط شده که باعث کاهش سرعت سایش و ضریب اصطکاک شده است. Lin و همکارانش [27] خواص سایشی کامپوزیت¬های مس با تقویت کننده نانو لوله کربنی با انجام آزمایش سایش را بررسی کردند. کامپوزیت‌های با 15%-10% درصد وزنی نانولوله کربنی می‌تواند نرخ سایش و ضریب اصطکاک را کاهش دهد. بعد از اضافه کردن نانولوله کربنی به کامپوزیت، میزان تغییر شکل پلاستیک در طی آزمون سایش کاهش یافت. با افزایش سرعت لغزش، میزان سایش با توجه به تشکیل فیلم کربن روانکاری بر روی سطح کاهش می یابد. در کار دیگری هانگ (Huang) و همکارانش [28] خواص سایشی کامپوزیت‌ها با تقویت کننده نانومتری در زمینه مس را بررسی کردند که میزان سایش زمینه مس با تقویت کننده نانو لوله کربن 90%، نسبت به مس خالص کمتر می باشد. این به شکل گیری فیلم روان کننده جامد روی سطح سایش کامپوزیت مربوط می شود. در طول آزمون سایش، نانولوله های کربن از زمینه مس جدا شده و سپس بر روی سطح سایش یک لایه روان کننده جامد تشکیل می¬دهند. با توجه به رفتار تقویتی و روانکاری نانو لوله¬های کربنی، این تحقیق به بررسی رفتار سایشی نانوکامپوزیت های Cu-Zn/CNT پرداخته است و نانوکامپوزیت مس-روی با روش متالوژی پودر و فرایند آهنگری ساخته شد. آزمون سایش بر اساس روش پین بر روی دیسک بر اساس استاندارد G99، پارامترهای اصطکاک و سایش در بارهای مختلف و همچنین سرعت لغزش متفاوت مورد مطالعه و بحث قرار گرفته است.

دلیل استفاده از آلیاژ Cu-5Zn، این آلیاژ معروف به برنج طلاکاری (با ۵ درصد روی) می باشد. برنج طلاکاری بیشترین کاربرد را در صنعت طلا و جواهرسازی برای ساخت روکش‌های طلایی رنگ دارد. شکل‌پذیری این برنج مانند مس است اما استحکام آن بیشتر است؛ در ضمن قابلیت ماشینکاری ضعیفی دارد. تحقیقات خیلی کمی بر روی برنج طلاکاری انجام شده است. هدف از این پژوهش بهبود خواص مکانیکی و سایشی این سری از آلیاژهای مس با استفاده از نانولوله های کربنی می باشد.

روش تحقیق

مواد و روش‌ها

نانو لوله های کربنی با طول 5-10 میکرومتر، قطر خارجی 30-50 نانومتر، قطر داخلی 5-10 نانومتر و خلوص> 95٪ که با روش (CVD) بخار رسوب شیمیایی تهیه شده بودند مورد استفاده قرارگرفتند. پودر آلیاژی مس-روی با ترکیب ۹۵ درصد مس و ۵ درصد روی، اندازه ذرات 2-10 میکرومتر و درصد خلوص> 99.5% از شرکت Chemie. Pvt. Ltd. India خریداری شد. برای جلوگیری از تشکیل کلوخه ها که در اثر تجمع نانو لوله های کربنی به وجود می آید، محلول به مدت 30 دقیقه در محلول اتانول در معرض امواج آلتراسونیک قرار داده شد. نانو لوله¬های کربنی با پوششی از نیکل تهیه شدند. خلاصه-ای از فرایندهای ارائه شده به شرح زیر است. برای شروع از محلول HNO3 (68%) جهت اصلاح سطح استفاده شد. پوشش الکتریکی نیکل در حمام نیکل که حاوی نمک‌های مختلف بود در حدود 30 دقیقه انجام شد. نانو لوله های کربنی بدون پوشش و با پوشش نیکل با پودر مس-روی در محلول اتانول تحت امواج آلتراسونیک هم زده شدند. بعد از 60 دقیقه دوغاب نانوکامپوزیت در داخل کوره در دمای 50 درجه سانتیگراد خشک شد. کامپوزیت‌ها با غلظت‌های متفاوتی از نانولوله های کربنی بدون پوشش و با پوشش نیکل (0.25، 0.5، 0.75 و 1) تحت فرآیند آسیاب مکانیکی تحت اتمسفر گاز آرگون قرار گرفتند که از گلوله ضد زنگ فولادی برای آسیاب کردن نمونه‌ها استفاده شد. پارامترهای انتخابی برای آسیاب گلوله‌ای عبارتند از:نسبت گلوله به پودر 10 به 1، سرعت 200 دور بر دقیقه و زمان 60 دقیقه.

در زمان آســـیاب کردن نمونه ها، یک وقفه متناوب 5 دقیقه‌ای در هر15 دقیقه به منظور جلوگیری از جوش ســـرد ذرات و افزایش دمای پودرها اعمال شـد. فشـرده سـازی سـرد پودرهای مخلوط شده با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیکی با فشار 400 مگاپا سکال برای 5 دقیقه انجام شد. پودر مس-روی و نانوکامپوزیت (نمونه‌های آماده شـــده) تحت فرآیند زینتر در کوره الکتریکی در دمای 850 درجه ســـانتیگراد به مدت 120 دقیقه تحت اتمسفر کنترل شده، قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها بعد از اتمام زینتر از کوره خارج شـده و تحت فرایند آهنگری قرار گرفتند. اعمال فشـار جانبی بر روی نمونه‌ها در دمای محیط، تا دستیابی به ضخامتی 8 میلی‌متر ادامه داشت. نمونه اولیه استوانه

ای به قطر 15 میلی متر و ارتفاع 20 میلی متر می باشد که بعد از اعمال فشار جانبی به ضخامت حدود 8 میلی متر و طول حدود 30 میلی متر می رسد.

آزمون و مشخصات

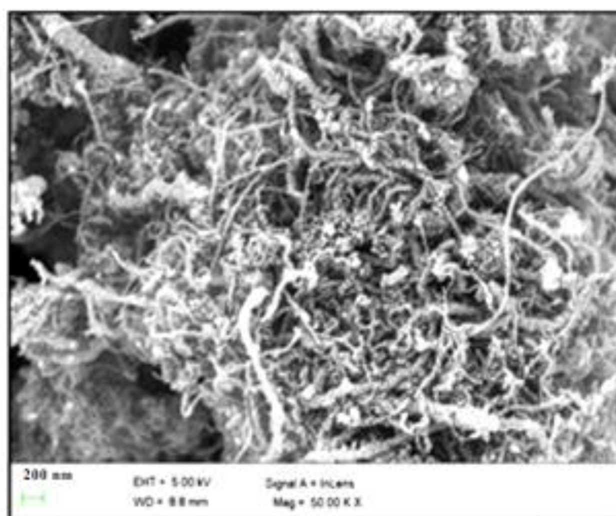
پراکندگی نانو لوله‌های کربنی با پوشش و بدون پوشش نیکل در زمینه آلیاژی مس-روی با استفاده از میکروسکوپ های SEM مدل SEM-TESCAN MIRA3-FEG مورد بررسی قرار گرفت. اثرات افزایش نانولوله‌های کربنی بر روی نانوکامپوزیت با آزمون سایش لغزشی با استفاده از روش پین بر روی دیسک بر اساس روش استاندارد ASTM G99 مطالعه شد. آزمون‌های سایش لغزشی تحت شرایط محیطی (در جه حرارت 24 در جه سانتیگراد، رطوبت 50٪) با سرعت لغزش متغیر از 0.3 تا 0.9 متر بر ثانیه برای مسافت لغز شی 5940 متر و تحت بارهای ۵ و ۲۵ نیوتن انجام شد. در ضمن، میزان سایش نمونه ها با استفاده از کاهش وزن نمونه ها در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج و بحث

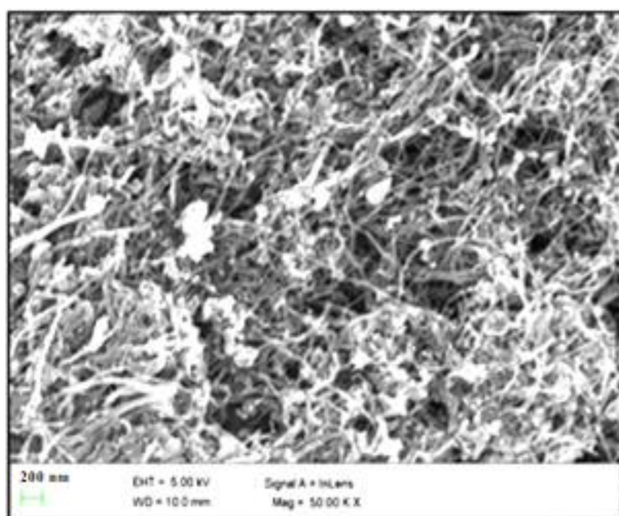
مطالعات ریزساختاری

در شکل (۱) تصاویر میکروسکوپ الکترونی نانو لوله های کربنی قبل از پوشش و بعد از ژوشش دهی با نیکل نشان داده است. همانطور که در شکل (۱-الف) نشان داده شده است، نانو لو له های کربنی در فرم خوشه ای قرار دار ند و به منظور شکستن خو شه ها، به مدت 30 دقیقه در محلول اتانول، تحت امواج اولتراسونیک قرار گرفتند. امواج آلتراسونیک باعث پراکندگی نانولوه های کربنی در داخل اتانول می شوند.

شکل (۱-ب) تصویر SEM از نانولوله های کربنی پو شش داده شده با نیکل با روش الکترولیز را نشان می‌دهد که در آن نیکل بر روی دیواره های خارجی نانولوله‌های کربنی پوشیده شده است. هدف اصلی ایجاد پوشش نیکل بر روی نانولوله های کربنی، بهبود اتصال بین نانولوله های کربنی و زمینه آلیاژ مس-روی است. انتقال بار موثر از زمینه فلز به نانولوله های کربنی باعث ایجاد نانوکامپوزیت قوی و بهبود خواص مکانیکی می شود. لازم است نانولوله های کربنی با زمینه برای انتقال بهتر بار، پیوند خوبی داشته باشند. علاوه بر این، زاویه تر شوندگی بین نانولوله‌های کربنی و زمینه با پوشش دهی با فلز نیکل بهبود یافت. دو جاردین (Dujardin) و همکاران [29] دریافتند که عامل تعیین کننده برای زاویه تر شوندگی کشش سطحی است.



ب



الف

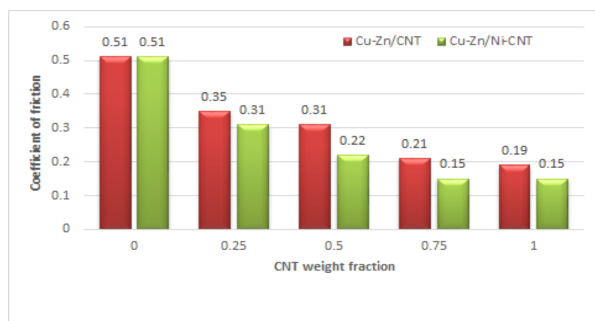
شکل ۱ عکس‌های میکروسکوپ الکترونی: (الف) نانو لوله‌های کربنی پایه و (ب) پوشش داده شده

مطالعه ضرایب اصطکاک

اثر تقویت کننده

شکل (۲) اثر مقدار متفاوت نانولوله های کربنی با پوشش نیکل و بدون آن بر روی ضرایب اصطکاک نانوکامپوزیت‌های مس–روی نشان داده شده است. در اینجا مسافت لغزشی و مقدار نیروی اعمالی به ترتیب 5940 متر و 5 نیوتن انتخاب شد. مشاهدات حاکی از آن است که نانوکامپوزیت‌ها با نانو لوله‌های کربنی بدون پوشش و پوشش نیکل در مقایسه با آلیاژ پایه مس–روی ضریب اصطکاک کمتری دارد.

کاهش در ضریب اصطکاک کامپوزیت با 1 درصد وزنی نانو لوله کربنی بدون پوشش نیکل و با پوشش نیکل در مقایسه با آلیاژ پایه به ترتیب 60.41 ٪ و 70.83 ٪ بدست آمد و این عمدتا به دلیل پراکندگی یکنواخت نانو لوله های کربنی می باشد. نانو لوله‌های کربنی به صورت همگن به خاطر عملیات پرس پراکنده شده‌اند. از آن جایی‌که فرایند پرس موجب شکستن کلوخه‌های نانو لوله‌های کربنی شده است در نتیجه نانو لوله‌های کربنی در زمینه مس به‌صورت یکنواخت پراکنده شده‌اند. در ضمن کاهش در ضریب اصطکاک در نانوکامپوزیت‌های مس–روی در مقایسه با مس–روی پایه عمدتا منجر به روانکاری به‌علت وجود نانولوله‌های کربنی شده است. در طول آزمون سایشی نانو لوله‌های کربنی در تماس با سطح مقطع دیسک بوده است. مقدار لایه روانکاری مبتنی بر نانولوله‌های کربن بستگی به درصد نانو لوله‌های کربنی دارد. مقدار لایه روانکاری با افزایش درصد نانو لوله کربنی در نانوکامپوزیت‌ها افزایش می یابد. بنابراین کمترین ضریب اصطکاک برای نانوکامپوزیت‌ها با بیشترین مقدار درصد وزنی نانو لوله¬های کربنی (0.75 درصد) مشاهده شده است. در آلیاژ پایه، میزان کرنش خمیری بالا بوده و میزان چسبندگی دانه‌ها با سطح دیسک بالا بوده که موجب بالا رفتن ضریب اصطکاک برای آلیاژ پایه شده است. شکل (۲) همچنین نشان می دهد که ضریب اصطکاک در نانوکامپوزیت با 1 درصد وزنی نانولوله کربنی نسبت به ۰٫۷۵درصد نانولوله کربنی ثابت بوده است. می‌توان علت احتمالی این پدیده در نانوکامپوزیت تقویت شده با 1 درصد وزنی نانو لوله کربنی را تجمع نانو لوله‌های کربنی در زمینه و کاهش اثر روانکاری مربوطه دانست [30,31].



شکل ۲ ضریب اصطکاک نانوکامپوزیت تقویت شده با نانو لوله‌های پوشش داده شده با نیکل و بدون نیکل در سرعت سایش 0.3 متر بر ثانیه

اثر سرعت لغزشی

شکل (۲) و (۳) ضریب اصطکاک آلیاژ مس–روی و نانوکامپوزیت های آن را در دو سرعت لغزش 0.3 و 0.9 متر بر ثانیه را نشان می دهد. در این آزمون با افزایش سرعت لغزش از 0.3 تا 0.9 متر بر ثانیه، مسافت لغزشی 5940 متر و میزان بار 5 نیوتن برای تمام آزمون‌های سایشی ثابت نگه داشته شد. مشاهده شد که با افزایش سرعت لغزشی، ضریب اصطکاک برای تمام مواد از جمله آلیاژ مس–روی و نانوکامپوزیت ها افزایش یافته است. ضریب اصطکاک برای نانوکامپوزیت با 0.75 درصد وزنی نانولوله¬های کربنی بدون پوشش و با پوشش به ترتیب از 0.15 به 0.25 و از 0.21 به 0.32 زمانی‌که سرعت لغزش از 0.3 متر بر ثانیه به 0.9 متر بر ثانیه تغییر کرد، افزایش یافت.

علت احتمالی افزایش ضریب اصطکاک در آلیاژ پایه و نانوکامپوزیت ها با افزایش سرعت لغزشی از 0.3 متر بر ثانیه به 0.9 متر بر ثانیه، فرآیند اکسیداسیون است. هنگامی که سرعت لغزش افزایش می‌یابد دمای بین نمونه و سطح مقطع دیسک در طول آزمون سایشی نیز افزایش خواهد یافت. این افزایش دما در محل اتصال آلیاژ پایه و نانو لوله‌های کربنی می تواند منجر به اکسیداسیون سطوح تماس نمونه با سطح مقطع دیسک شود. با افزایش سرعت سایشی، لایه اکسیدی که روی سطح نمونه تشکیل شده است، تمایل به شکستن دارند که موجب سایش در بدنه نانوکامپوزیت می¬شود. این پدیده قالب در این مورد منجر به افزایش ضریب اصطکاک در سرعت سایشی بالاتر می شود [32,33] دلیل دوم افزایش ضریب اصطکاک این است که با افزایش سرعت لغزشی، کرنش مومسایی در آلیاژ پایه و نانوکامپوزیت های آن در طی آزمون‌های لغزشی افزایش یافته است که احتمال چسبندگی بین نمونه ها و سطح مقطع را افزایش می دهد. اما در سرعت پایین سایشی، حضور نانو لوله‌های کربنی

در نانوکامپوزیت‌ها موجب کاهش کرنش مومسانی خواهد شد که ضریب اصطکاک کاهش می یابد. اما در سرعت لغزش بالاتر، کرنش مومسانی با افزایش چسبندگی موضعی افزایش خواهد یافت. بنابراین در سرعت لغزشی بیشتر، ضریب اصطکاک در آلیاژ پایه و نانوکامپوزیت های آن بیشتر می‌شود [34,35].

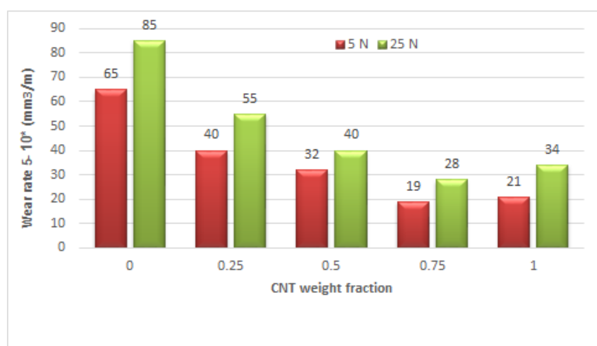


شکل ۳ ضریب اصطکاک نانوکامپوزیت تقویت شده با نانو لوله‌های پوشش داده شده با نیکل و بدون نیکل در سرعت سایش 0.9 متر بر ثانیه

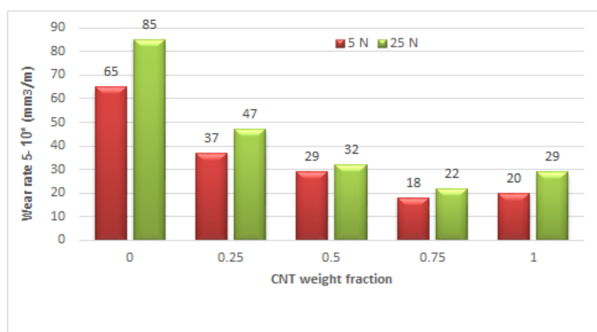
رفتار سایشی

اثر فاز تقویتی

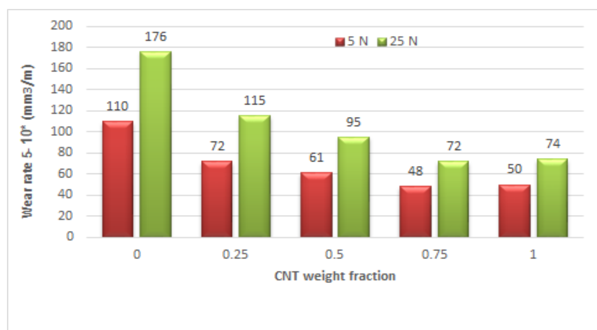
شکل (۴) تا (۷) اثر نانولوله کربنی بدون پوشش و با پوشش نیکل بر روی میزان سایش نانوکامپوزیت های زمینه مس–روی را نشان داده است. برای شکل (۴) سرعت سایش نانوکامپوزیت‌ها با نانولوله‌های کربنی پوشش داده شده را نشان می‌دهد. در بارهای متغییر 5 نیوتن و 25 نیوتن، سرعت و فاصله لغزشی به ترتیب با مقادیر 0.3 متر بر ثانیه و 5940 متر ثابت نگه داشته شد. سرعت سایش تخمینی برای آلیاژ پایه مس–روی $65*10^{-5}$ mm^3/m بدست آمد. در حالی‌که برای نانوکامپوزیت با 0.75 درصد وزنی نانو لوله‌های کربنی بدون پوشش برابر با 19*10-5 mm3/m برای بار 5 نیوتن بدست آمد. هنگامی که بار از 5 نیوتن به 25 نیوتن افزایش می یابد، سرعت سایش برای آلیاژ پایه مس– روی $85*10^{-5}$ mm^3/m و برای نانوکامپوزیت¬های با 0.75 درصد وزنی نانو لوله‌های کربنی بدون پوشش نیکل $28*10^{-5}$ mm^3/m بدست آمد. کاهش شکل (۵) سرعت سایش نانوکامپوزیت‌ها با نانو لوله‌های کربنی پوشش داده شده با نیکل را در بار 5 نیوتن , 25 نیوتن و سرعت سایشی و فاصله سایشی به ترتیب برابر با 0.3 متر بر ثانیه و 5940 متر نشان داده است. سرعت سایش تخمینی برای آلیاژ پایه مس–روی $65*10^{-5}$mm^3/m بدست آمد در حالی که برای نانوکامپوزیت با 0.75 درصد وزنی نانولوله‌های کربنی پوشش داده شده با نیکل $18*10^{-5}$ mm^3/ برای بار 5 نیوتن بدست آمد. هنگامی که بار از 5 نیوتن تا 25 نیوتن افزایش یافت، سرعت سایشی برای آلیاژ پایه مس–روی $85*10^{-5}$ mm^3/m است در حالی‌که سرعت سایشی برای نانوکامپوزیت تقویت شده با 0.75 درصد وزنی نانو لوله‌های کربنی با پوشش نیکل، $22*10^{-5}$ mm^3/m بدست آمد.



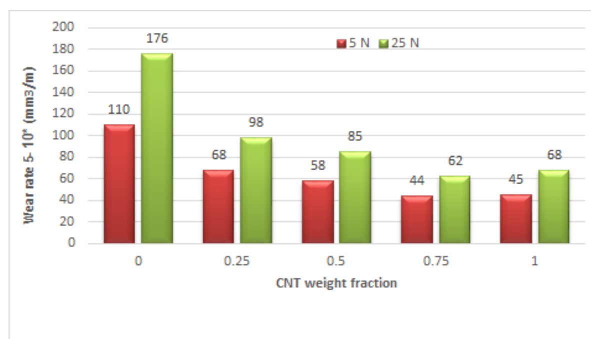
شکل ۴ نرخ سایش نانوکامپوزیت تقویت شده با نانو لوله‌های پوشش داده نشده در سرعت سایش 0.3 متر بر ثانیه



شکل ۵ نرخ سایش نانوکامپوزیت تقویت شده با نانو لوله‌های پوشش داده شده با نیکل در سرعت سایش 0.3 متر بر ثانیه



شکل ۶ نرخ سایش نانوکامپوزیت تقویت شده با نانو لوله‌های پوشش داده نشده در سرعت سایش 0.9 متر بر ثانیه



شکل ۷ نرخ سایش نانوکامپوزیت تقویت شده با نانو لوله‌های پوشش داده شده با نیکل در سرعت سایش 0.9 متر بر ثانیه.

علاوه بر این به علت سختی بالای نانو لوله‌های کربنی، جریان مومسانی زمینه در طول سایش لغزشی محدود می‌شود. هرچه قدر میزان مقدار نانو لوله‌های کربنی بیشتر باشد کرنش برشی بیشتری برای جریان مومسانی از زمینه در نانوکامپوزیت مربوط به آن لازم است. محدودیت ناشی از نانو لوله¬های کربنی این است که چرا نانوکامپوزیت‌ها نسبت به آلیاژ پایه مس–روی سایش کمتری دارند. مقاومت به سایش با افزایش محتوای نانو لوله‌های کربنی و پراکندگی بهتر آن در زمینه فلز مس افزایش می یابد. با این حال درنانوکامپوزیت با 1 درصد وزنی نانو لوله کربنی بدون پوشش و با پوشش نیکل، نرخ سایش افزایش جزئی یافته است. افزایش نرخ سایش این نانوکامپوزیت¬ها می تواند به علت ایجاد کلوخه¬های نانولوله های کربنی باشد. کلوخه ای شدن نانولوله های کربنی یک ناحیه ضعیف در زمینه مس–روی ایجاد می کنند که موجب کاهش میکروسختی می‌شود. علاوه بر این، عدم وجود لایه کربن روان کننده، تماس فلز با فلز را افزایش داده و به علت سختی ضعیف و لایه روانکاری ناکافی، زبری‌های سطح مقطع به راحتی به سطح نانوکامپوزیت نفوذ کرده که منجر به افزایش میزان سایش شده است [30].

اثر سرعت لغزشی

اثر سرعت لغزشی بر میزان سایش آلیاژ پایه مس–روی و نانوکامپوزیت های آن در شکل‌های (۶) و (۷) در سرعت‌های لغزشی 0.3 و 0.9 متر بر ثانیه نشان داده شده است. برای تمام آزمون‌های لغزشی فاصله 5940 متر ثابت نگه داشته شد. با افزایش سرعت لغزشی همه مواد از جمله مس–روی و نانوکامپوزیت‌های آن افزایش در نرخ سایش دیده شد. برای بار 5 نیوتن، بیشترین نرخ سایشی برای آلیاژ پایه مس–روی $110*10^{-5}$ mm^3/m مشاهده شد در حالی‌که کمترین نرخ سایشی $48*10^{-5}$ mm^3/m برای نانوکامپوزیت با 0.75 درصد نانو لوله کربنی بدست آمد. نرخ سایش برای بار 25 نیوتن و سرعت 0.9 متر بر ثانیه، برای آلیاژ پایه مس–روی $176*10^{-5}$ mm^3/m بدست آمد در حالی‌که برای نانوکامپوزیت با 0.75 درصد نانو لوله کربنی با پوشش نیکل، نرخ سایشی $72*10^{-5}$ mm^3/m بدست آمد. برای هر دو مقدار بار گذاری بالاتر و پایین‌تر، نرخ سایش برای آلیاژ پایه مس–روی به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از نانوکامپوزیت بود. علاوه بر این می‌توان مشاهده کرد که نرخ سایش برای آلیاژ پایه مس–روی در مقایسه با نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی بدون پوشش و با پوشش نیکل کلا افزایش یافته است. با توجه به افزایش نانو لوله‌های کربنی، میزان سایش در مقایسه با آلیاژ پایه مس–روی کاهش می یابد.

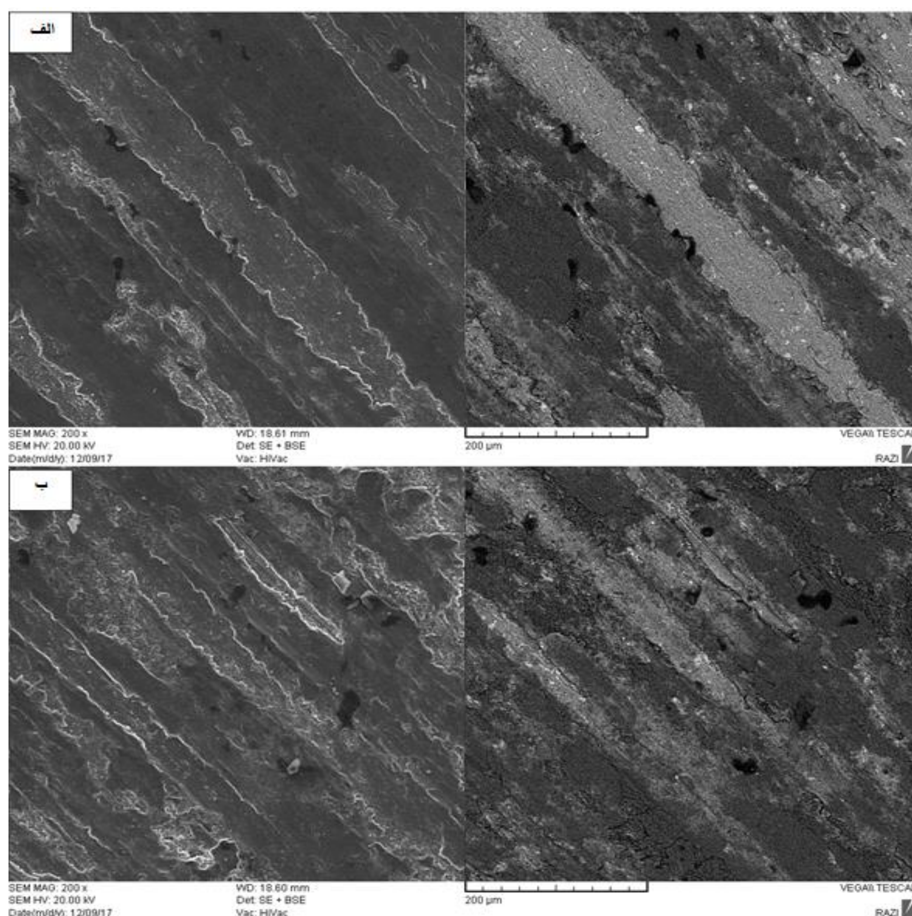
تحقیقات انجام شده نشان داده¬اند که نرخ سایش به میزان بار اعمال شده وابسته است. بنابراین اگر بار یا فشار روی مس و نانوکامپوزیت ها از 5 نیوتن به 25 نیوتن افزایش یابد، نرخ سایش نیز به صورت خطی افزایش می یابد. در میزان بار بالاتر، زبری¬های سطح مقطع به سطح آلیاژ مس–روی و نانوکامپوزیت ها نفوذ کرده که منجر به افزایش سرعت حذف مواد می شود. با این حال میزان سایش نانوکامپوزیت‌ها در مقایسه با آلیاژ پایه مس–روی کمتر بوده که به علت وجود نانو لوله–های کربنی می‌باشد که موجب کاهش نرخ سایش به علت خاصیت روانکاری در سطح مشترک شده است.

آنالیز سطوح سایش

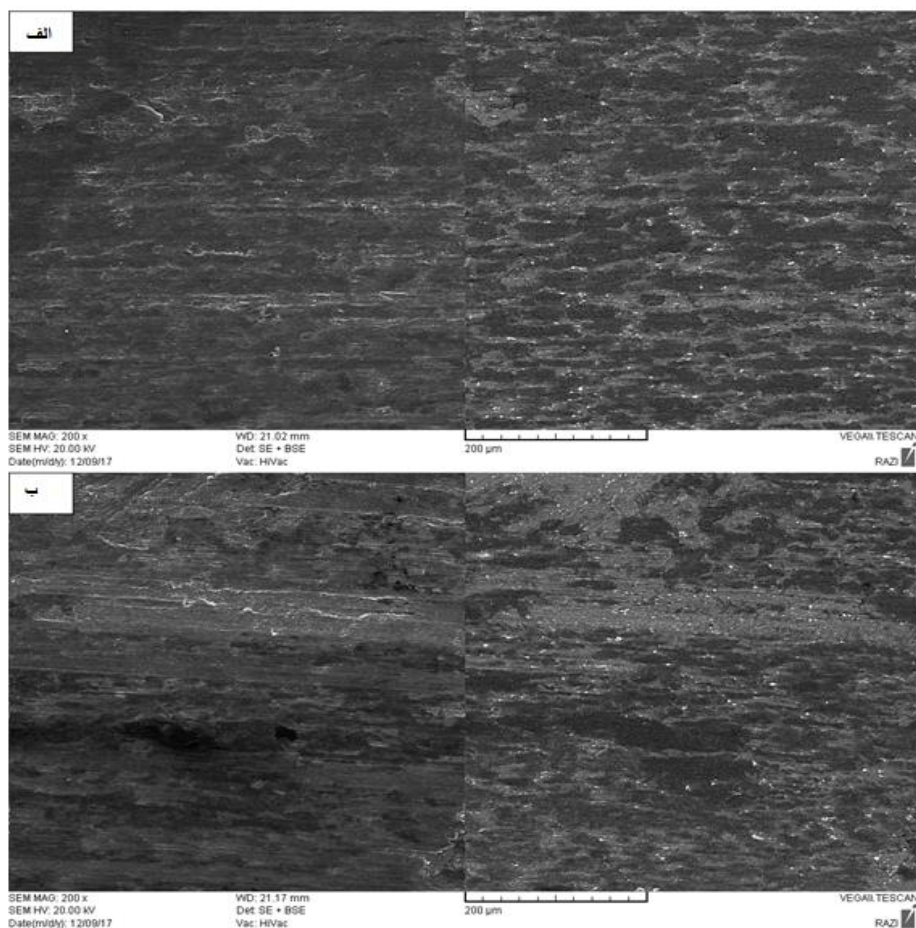
شکل‌های (۸) تا (۱۰) نشان دهنده تصویر SEM از سطح سایش آلیاژ پایه مس–روی و نانوکامپوزیت‌های آن در دو بار مختلف و سرعت لغزش ثابت 0.3 متر بر ثانیه و فاصله لغزشی 5940 متر است. در شکل (۸) تصویر SEM از سطح آلیاژ پایه مس–روی که در آن شیارهایی در بار کم 5 نیوتن دیده شده در حالی‌که تغییر توده مومسانی با شیارهایی در بار 25 نیوتن دیده شده است که این تغییر شکل (توده مومسانی) موجب شکست در سطح مس در بار بیشتر شده است. کرنش برشی تولید شده در طی سایش به سطح مس منتقل شده و باعث ایجاد ترک‌هایی کوچک زیر سطحی و شیارهای کوچک در آلیاژ پایه مس–روی شده است. شیارها در هر دو بار پیوسته و موازی با جهت سایشی بوده و سبب نفوذ زبری‌های سخت سطح مقطع دیسک به زمینه نرم

مس–روی شده که منجر به افزایش سایش شده است. با افزایش بار از 5 نیوتن به 25 نیوتن، عمق سایشی افزایش یافته و در عین حال در گستره وسیعی جدا شدن لایه از سطح دیده می‌شود. شکل (۹)، تصویر میکروسکوپ الکترونی از نانوکامپوزیت‌های حاوی 0.25 درصد وزنی نانو لوله‌های کربنی را در بارهای مختلف 5 نیوتن و 25 نیوتن و سرعت لغزش ثابت 0.3 متر بر ثانیه و مسافت لغزش 5940 متر نشان می¬دهد. سطح سایش از میکروشیارها و مقدار کمی از تغییر شکل مومسانی در نانوکامپوزیت 0.25 درصد وزنی نانو لوله‌های کربنی در بارهای 5 نیوتن و 25 نیوتن درشکل (۹) نشان داده شده است.

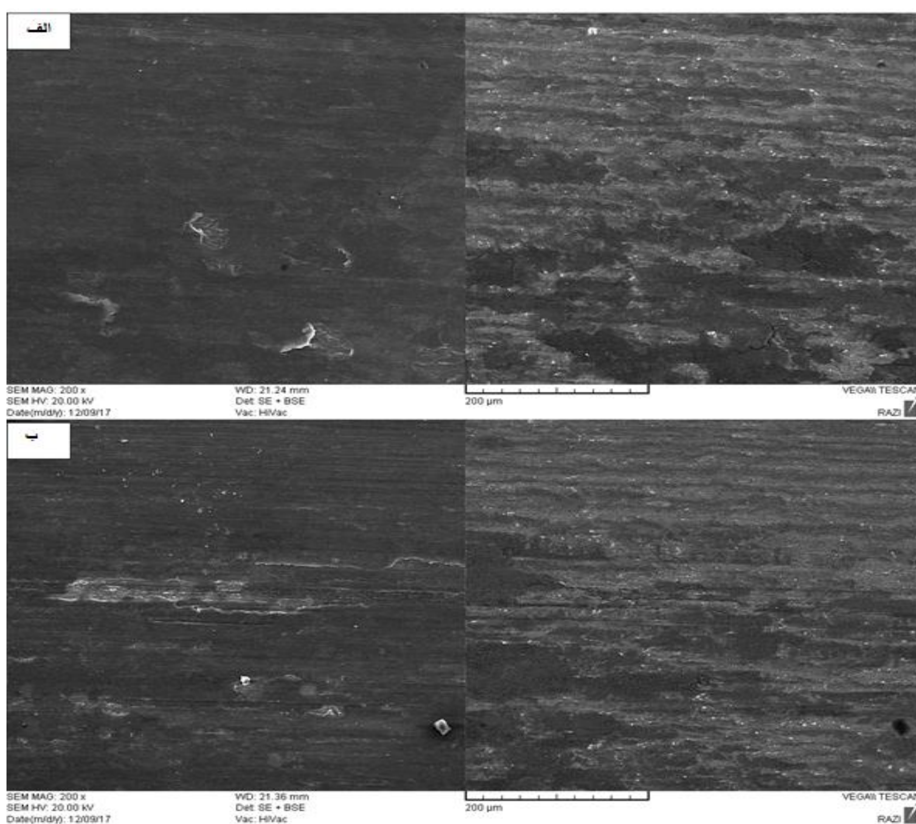
شکل (۱۰) سطوح سایش یافته نانوکامپوزیت‌های حاوی 0.25 درصد وزنی نانو لوله‌های کربنی با پوشش نیکل در بارهای مختلف 25 نیوتن و 5 نیوتن نشان داده است. مشاهده می شود که سطح نانوکامپوزیت‌ها با پوشش نیکل نسبت به بدون پوشش نیکل با تقویت کننده نانو لوله¬کربنی کاملا صاف است. این امرعمدتا به دلیل پیوند مشترک بین نانولوله ها با پوشش نیکل و زمینه است که به شدت مقاومت در برابر تغییر شکل مومسانی و میکروشیارها را ازخود نشان داده است. علاوه بر این در نانوکامپوزیت های مس–روی، شیارهای سایشی مشاهده شده اما عمق و عرض آن شیارها به اندازه آلیاژ پایه مس–روی نیست. این عمدتا به دلیل خواص انتقال بار نانو لوله‌های کربنی مربوط است که به زمینه در بارهای بالاتر کمک کرده است. علاوه بر افزایش محتوای نانو لوله‌های کربنی، محدودیت تغییر شکل مومسانی یا جریان زمینه افزایش یافته و همچنین مقاومت در برابر کشش، در طی آزمون سایشی، می تواند به علت وجود پیوند مشترک بین نانولوله‌ها با پوشش نیکل و زمینه باشد. باتوجه به این اتصال خوب، میزان کشش نانو لوله‌ها حداقل بوده که در سطوح نسبتا صاف نانوکامپوزیت ها منعکس شده است. از این رو در سطح نانوکامپوزیت ها، ویژگی‌هایی همچون شیارهای پوششی خوب و حداقل میزان جدایش لایه از سطوح بارگذاری در بارهای پایین تر دیده شده است [36,37].



شکل ۸ سطح سایش آلیاژ پایه مس–روی در: (الف) 5 نیوتن، (ب) 25 نیوتن.



شکل ۹ سطح سایش نانوکامپوزیت با 0.25 درصد وزنی نانولوله‌های کربنی پوشش داده نشده در (الف) 5 نیوتن، (ب) 25 نیوتن

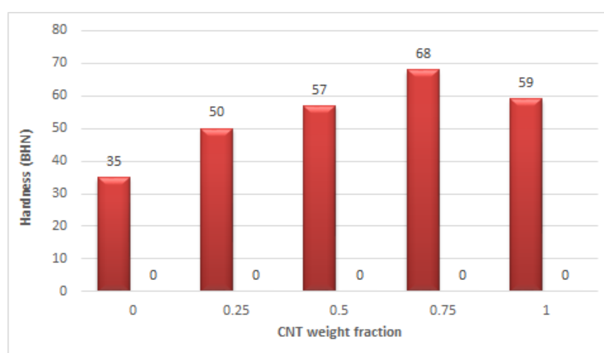


شکل ۱۰ سطح سایش نانوکامپوزیت با 0.25 درصد وزنی نانولوله‌های کربنی پوشش داده شده در (الف) 5 نیوتن، (ب) 25 نیوتن

در نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانو لوله هایی با پوشش نیکل 0.25 و 0.75 مشاهده شده است که محصولات سایشی در نانوکامپوزیت‌های ذکر شده در مقایسه با آلیاژ پایه مس–روی و نانوکامپوزیت‌هایی با نانولوله‌های کربنی بدون پوشش بسیار کمتر است. این به سختی زیاد نانوکامپوزیت‌های مس با تقویت کننده نانو متری با پوشش نیکل مربوط می‌باشد.

بر روی سطح سایش نمونه تقویت شده با نانولوله های کربنی تشکیل فیلم روان کننده مشاهده شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب نانو لوله‌های کربنی با پوشش نیکل و بدون پوشش، می‌تواند مقاومت سایشی را در مقایسه آلیاژ پایه مس–روی افزایش دهد [38-43]. نیروهای چسبنده قوی در سطوح تماس موجب تشکیل ناهمواری‌های برشی و محصولات سایشی درهر دو نانوکامپوزیت شده است.

بدین ترتیب مکانیسم سایشی در نانوکامپوزیت‌ها عمدتا دو نوع هستند: اولین مکانیزم غالب، سایش پلاستیکی است، که شامل پوسته پوسته شدن و دومین مکانیزم، سایش چسبنده و حرارتی مانند سایش اکسایشی و تشکیل لایه‌های اکسیدی می‌باشد.



شکل ۱۱ سختی نانوکامپوزیت تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی پوشش داده شده با نیکل در درصدهای مختلف نانولوله

شکل (۱۱) نتایج سختی سنجی نمونه های مختلف را نشان می دهد. همانطور که در شکل مشاهده می کنید با افزایش میزان درصد نانولوله های کربنی سختی افزایش یافته است. در ۱ درصد وزنی بدلیل کلوخه ای شدن نانولوله های کربنی در ساختار، سختی کاهش می یابد. این نتایج کاملا منطبق بر نتایج تست سایش می باشد.

نتیجه گیری

نتایج بدست آمده به شرح زیر است:

۱. نانوکامپوزیت‌های مس–روی تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی پوشش داده شده با نیکل و بدون پوشش نیکل، با استفاده ازفرآیند اولیه متالورژی پودر به طور موفقیت آمیز تهیه شد و پرس به عنوان فرآیند ثانویه مورد استفاده قرار گرفت.

۲. با افزایش محتوای نانو لوله‌های کربنی، ضریب اصطکاک نانوکامپوزیت‌های مس–روی تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی پوشش داده شده با نیکل و بدون پوشش نیکل کاهش یافت.

۳. کاهش در ضریب اصطکاک نانوکامپوزیت‌های مس در مقایسه با آلیاژ پایه مس–روی مربوط به اثر روانکاری نانو لوله‌های کربنی می باشد.

۴. میزان سایش برای هر دو نانوکامپوزیت تقویت شده با پوشش نیکل و بدون پوشش، با افزایش میزان نانو لوله‌های کربنی کاهش پیدا کرد. نرخ سایش کم این نانوکامپوزیت‌ها، به سختی بالا و محدودیت جریان مومسانی توسط نانو لوله‌های کربنی مربوط می شود.

۵. با افزایش بار از 5 نیوتن به 25 نیوتن و سرعت سایش از 0.3 متر بر ثانیه به 0.9 متر بر ثانیه، نرخ سایش نانوکامپوزیت¬های مس–روی تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی با پوشش نیکل و بدون پوشش افزایش یافته است.

۶. در بررسی سطوح سایش عواملی مانند چسبندگی، پوسته پوسته شدن و سایش اکسایشی در آلیاژ پایه مس–روی و نانوکامپوزیت‌های آن تاثیر گذار است.

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] F. Rikhtegar, S. Shabestari, H. Saghafian, "Investigation of microstructure and mechanical properties of Al2024-CNT nanocomposite produced by flake powder metallurgy process", *In Persian, Journal of Science and Technology*

of Composites, Vol. 4, No. 1, pp. 91-100, 2017.

[2] S. Mirzamohammadi, H. Khorsand, M. Aliofkhazraei, "Mechanical behavior of Ni-Al2O3 nanocomposite coatings electroplated in the precence of organic compounds", *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 3, pp. 245-254, 2017.

[3] M. Dinulović, B. Rašu, "Dielectric modeling of multiphase composites", *Composite Structures*, Vol. 93, Issue 12, pp. 3209- 3215, 2011.

[4] Neha Arora, N.N. Sharma, " Arc discharge synthesis of carbon nanotubes: Comprehensive review ", *Diamond and Related Materials*, Vol. 50, pp. 135-150, 2014.

[5] C.G. Kaufmann, R.Y.S.Zampiva, C.P.Bergmann, A. K.Alves, S.R. Mortari, A.Pavlovic, "Production of multi-wall carbon nanotubes starting from a commercial graphite pencil using an electric arc discharge in aqueous medium", *FME Transactions*, Vol. 46, pp. 151-156, 2018.

[6] P. J. F.Harris, "Carbon nanotube science", Cambridge University Press, New York, 2009.

[7] P.W.R.Beaumont, C. Soutis, and A.Hodzic, "Structural integrity and durability of advanced composites: Innovative modelling methods and intelligent design", Elsevier, Cambridge, UK, 2015.

[8] G.Overney, W.Zhong, D.Tomanek, "Structural rigidity and low-frequency vibrational-modes of long carbon tubules", *Zeitschrift für Physik / D: Atoms, molecules and clusters*, Vol. 27, pp. 93-96, 1993.

[9] J.P.Lu, "Elastic properties of carbon nanotubes and nanoropes", Physical Review Letters, Vol. 79, pp. 1297- 1300, 1997.

[10] M.M.J.Treacy, T.W.Ebbesen and J.Gibson, "Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes", Nature, Vol. 381, pp. 678-680, 1996.

[11] P.G.Koppad, V.K.Singh, C.S.Ramesh, R.G.Koppad and K.T.Kashyap, "*Metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes*", In: Tiwari, A., Shukla, S.K. (Eds.): Advanced Carbon Materials and Technology, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, pp. 331-376, 2013.

[12] G.Qianming, Li Dan, L Zhi, Y.Xiao-Su , L.Ji, "Tribology properties of carbon nanotube-reinforced composites, In: Friedrick, K., Schlarb, A.K. (Eds.)", *Tribology and Interface Engineering Series*, Vol. 55, pp. 245-267, 2008.

[13] H. M.Mallikarjuna, C. S.Ramesh, P. G.Koppad, R.Keshavamurthy and K.T Kashyap, "Effect of carbon nanotube and silicon carbide on microstructure and dry sliding wear behavior of copper hybrid nanocomposites", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 26, pp. 3170-3182, 2016.

[14] H. M.Mallikarjuna, K. T.Kashyap, P. G Koppad, C. S.Ramesh, R.Keshavamurthy,"Microstructure and dry sliding wear behavior of Cu-Sn alloy reinforced with multiwalled carbon nanotubes", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 26, pp. 1755-1764, 2016.

[15] P. G.Koppad, K. T.Kashyap, V.Shrathinth, T. A.Shetty, R. G.Koppad, "Microstructure and microhardness of carbon nanotube reinforced copper nanocomposites", *Materials Science and Technology*, Vol. 29, pp. 605-609, 2013.

[16] P. G.Koppad, H. R.Aniruddha Ram, K. T Kashyap, "On shear-lag and thermal mismatch model in multiwalled carbon nanotube/copper matrix nanocomposites", *Journal of Alloys and Compounds.*, Vol. 549, pp. 82-87, 2013.

[17] P. G.Koppad, H. R. A.Ram, C. S.Ramesh, K. T.Kashyap, R. G. Koppad, "On thermal and electrical properties of multiwalled carbon nanotubes/copper matrix nanocomposites", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 580, pp.

527-532, 2013.

[18] R.George, K. T.Kashyap, R.Rahul, S.Yamdagni, "Strengthening in carbon nanotube/aluminium (CNT/Al) composites", *Scripta Materialia 53*, pp. 1159- 1163, 2005.

[19] H. R. A.Ram, P. G.Koppad, K. T.Kashyap, "Nanoindentation studies on MWCNT/aluminum alloy 6061 nanocomposites", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 559, pp. 920-923, 2013.

[20] K. T.Kashyap, K. B.Puneeth, A.Ram, P. G.Koppad, "Ageing kinetics in Carbon nanotube reinforced Aluminium alloy AA6063", *Materials Science Forum*, Vol. 710, pp. 780-785, 2012.

[21] J. P.Tu, Y. Z Yang, L. Y.Wang, X. C.Ma, X. B.Zhang, "Tribological properties of carbon-nanotube- reinforced copper composites", *Tribology Letters*, Vol. 10 pp. 225-228, 2001.

[22] K. T.Kim, S. I.Cha, S. H.Hong, S. H.Hong, "Microstructures and tensile behavior of carbon nanotubes reinforced Cu matrix nanocomposites", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 430, pp. 27-33, 2006.

[23] Y.A.Sorkhe, H. Aghajani, A.Taghisadeh Tabrizi, "Synthesis and characterisation of Cu–TiO2 nanocomposite produced by thermochemical process, Powder Metallurgy", *Powder Metallurgy*, pp. 107-111, 2016.

[24] G.Naseri Azari Golnaz, A.Taghizadeh Tabrizi, , H.Aghajani, "Investigation on corrosion behavior of Cu–TiO2 nanocomposite synthesized by the use of SHS method", *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 8, Issue 2, pp. 2216-2222, 2019.

[25] S.A.N.Mehrabani, A.T.Tabrizi, H.Aghajani and H.Pourbagheri, "Corrosion Behavior of SHS-Produced Cu–Ti–B Composites", *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, Vol. 29, No. 3, pp. 167–172, 2020.

[26] H.Aghajani, M.Roostaei, S.Sharif Javaherian, A.Taghizadeh A.Tabrizi, Abdoli Silabi, N.Farzam Mehr, "Wear behavior of self-propagating high-temperature synthesized Cu-TiO2 nanocomposites", *Synthesis and Sintering*, Vol. 1, no. 3, pp. 127-134, 2021.

[27] C.B.Lin, Z.Chang, Y. H.Tunga, K. Ko, "Manufacturing and tribological properties of copper matrix/carbon nanotubes composites", *Wear*, Vol. 270, pp 382-394, 2011.

[28] Z.Huang, Z.Zheng, S.Zhao, S.Dong, P.Luo, L.Chen, "Copper matrix composites reinforced by aligned carbon nanotubes: Mechanical and tribological properties", *Materials and Design*, Vol. 133, pp 570-578, 2017.

[29] E.Dujardin, T. W.Ebbesen, H.Hiura and K.Taigaki, "Capillarity and wetting of carbon nanotubes", *Science*, Vol. 265, pp 1850-1852, 1994.

[30] K.Rajkumar, S.Aravindan, "Tribological characteristics of copper-nano carbon crystalline composites", *In: Tyagi, R., Davim, J.P. (Eds.): Processing techniques and tribological behaviour of composite materials. IGI Global, Hershey*, pp. 107-125, 2015.

[31] P.Manikandan, R.Sieh, A.Elayaperumal, H. R.Le, S. Basu, "Micro/Nanostructure and tribological characteristics of pressureless sintered carbon nanotubes reinforced aluminium matrix composites", *Journal of Nanomaterials*, Article ID 9843019, 2016.

[32] K. Rajkumar, S. Aravindan., “Tribological performance of microwave sintered copper–TiC–graphite hybrid composites", *Tribology International*, Vol. 44, no. 4, PP. 347-358, 2011.

[33] C. S.Ramesh, N.Ahmed, M. A.Mujeebu, M. Z.Abdullah, "Development and performance analysis of novel cast copper–SiC–Gr hybrid composites", *Materials and Design*, Vol. 30(6), pp. 1957-1965, 2009.

[34] C. A. V.Kumar, J. S.Rajadurai, "Influence of rutile (TiO2) content on wear and microhardness characteristics of aluminium-based hybrid composites synthesized by powder metallurgy", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 26, pp 63-73, 2016.

[35] G.Gautam, N Kumar, A.Mohan, R. K.Gautam, S.Mohan, "Tribology and surface topography of tri-aluminide reinforced composites", *Tribology International*, Vol. 97, pp 49-58, 2016.

[36] H. M.Mallikarjuna, C. S.Ramesh, P. G.Koppad, R. Keshavamurthy, K. T. Kashyap, "Effect of carbon nanotube and silicon carbide on microstructure and dry sliding wear behavior of copper hybrid nanocomposites", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 26, pp 3170-3182, 2016.

[37] Jalal Jafari, Mohammad Kazem Besharati Givi & Mohsen Barmouz," Mechanical and microstructural characterization of Cu/CNT nanocomposite layers fabricated via friction stir processing", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 78, pp. 199-209, 2015.

[38] M.Ruiz-Andrés, A.Conde, de J.,Damborenea, I.García, "Wear behavior of aluminum alloys at slow sliding speeds", *Tribology Transactions*, Vol. 58, pp. 955-962, 2015.

[39] K. R.Kumar, K. M.Mohanasundaram, G.Arumaikkannu, R.Subramanian, "Analysis of parameters influencing wear and frictional behavior of aluminum–fly ash composites", *Tribology Transactions*, Vol. 55, pp 723-729, 2012.

[40] K.Rajkumar, S.Aravindan, "Tribological studies on microwave sintered copper carbon nanotube composites", *Wear*, Vol. 270, pp 613-621, 2011.

[41] B.Chen, J.Yang, Q Zhang, H.Huang, H. Li, H.Tang, C.Li, "Tribological properties of copper-based composites with copper coated NbSe2 and CNT", *Materials and Design*, Vol. 75, pp. 24-31, 2015.

[42] C. H Guiderdoni, C.Estournes, A.Peigney, A. Weibel, V.Turq, C. H.Laurent, "The preparation of double-walled carbon nanotube/Cu composites by spark plasma sintering and their hardness and friction properties", *Carbon*, Vol. 49, pp 4535-4543, 2011.

[43] S. R.Dong, J. P.Tu, X. B.Zhang, "An investigation of the sliding wear behavior of Cu-matrix composite reinforced by carbon nanotubes", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 313, pp 83-87, 2001.